

## Assessment of Climate Change Impacts on Surface Water Resources (Case Study: The Meymeh Watershed, Ilam Province, Iran)

- 1- Department of Range and Watershed Management, Agriculture Faculty, Ilam University, Ilam, Iran.
- 2- Department of Range and Watershed Management, Agriculture Faculty, Ilam University, Ilam, Iran.
- 3- Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran.
- 4- Department of Range and Watershed Management, Agriculture Faculty, Ilam University, Ilam, Iran.

\* Corresponding author: [m.tavakoli@ilam.ac.ir](mailto:m.tavakoli@ilam.ac.ir)

### Extended Abstract

#### Introduction

Climate change is recognized as one of the most critical environmental challenges of the present century, exerting profound impacts on the hydrological cycle and particularly on surface water resources. Rising air temperature and alterations in the temporal and spatial distribution of precipitation have led to significant changes in runoff generation, river discharge regimes, and the frequency and intensity of extreme events such as floods and droughts. These impacts are more pronounced in arid and semi-arid regions, including western Iran, where water resources are highly sensitive to climatic variability. The Meymeh watershed in Ilam Province plays a vital role in supplying agricultural, domestic, and industrial water, and the construction of the Meymeh Dam has further increased its strategic importance. Despite this significance, no studies have evaluated climate change impacts on this basin using the latest IPCC Sixth Assessment Report scenarios. Therefore, the present study aims to assess the effects of climate change on surface water resources in the Meymeh watershed using the CanESM5 global climate model, the LARS-WG statistical downscaling model, and the SWAT hydrological model.

#### Materials and Methods

Future climatic conditions were simulated using outputs from the CanESM5 global climate model under SSP1-2.6 and SSP2-4.5 scenarios. These outputs were downscaled to the local scale using the LARS-WG model to generate daily precipitation and temperature data for the period 2031–2060. The performance of LARS-WG was evaluated using statistical indices including  $R^2$ , RMSE, and MSE. To assess hydrological responses, the semi-distributed SWAT model was employed. Input data included a digital elevation model, land use and soil maps, and daily meteorological data from 18 stations. Model calibration and validation were performed using the SWAT-CUP software with the SUFI-2 algorithm for the periods 2010–2016 and 2017–2020, respectively. Model performance was evaluated using the Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) and the coefficient of determination ( $R^2$ ) based on observed and simulated streamflow data.

#### Results and Discussion

Calibration results demonstrated a substantial improvement in SWAT model performance, with  $R^2$  increasing from 0.21 to 0.74 and NSE from 0.18 to 0.72. During the validation period,  $R^2$  and NSE reached 0.90 and 0.87, respectively, indicating high simulation accuracy. Climate projections generated by LARS-WG showed that mean annual temperature is expected to increase by approximately 2.9 °C (10.8%) under the SSP2-4.5 scenario, while mean annual precipitation is projected to decrease by about 13.1% compared to the baseline period. Hydrological simulations revealed a pronounced decline in surface runoff and river discharge. The mean annual streamflow is projected to decrease from 5.63 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> in the baseline period to 1.61 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> in the future period, representing an approximate 70% reduction. Additionally, annual peak discharge is expected to decrease by up to 80%, and summer flows are projected to approach zero in many years, indicating an increased risk of hydrological drought despite a reduced likelihood of large floods.

#### Conclusion

The findings of this study indicate that future climate change will have severe impacts on surface water resources in the Meymeh watershed. Rising temperatures, reduced effective precipitation, and increased evapotranspiration collectively lead to a substantial reduction in runoff and significant alterations in the seasonal flow regime. The projected 70% decline in mean annual discharge and the pronounced reduction in spring and winter flows pose serious challenges to agricultural water supply, domestic use, and aquatic ecosystem sustainability. Results further suggest that the SSP2-4.5 scenario will result in more critical water stress conditions compared to the optimistic SSP1-2.6 scenario. Consequently, the implementation of climate adaptation strategies such as watershed management practices, artificial groundwater recharge, crop pattern modification, and improvements in water-use efficiency is essential. The integrated modeling framework applied in this study provides a robust scientific basis for sustainable water resources planning and management in western Iran under future climate change conditions.

**Keywords:** Climate change, Runoff, SWAT model, LARS-WG, CanESM5.

## تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز میمه، ایلام)

مریم رسولی<sup>۱</sup>، محسن توکلی<sup>۲\*</sup>، حیدر ابراهیمی<sup>۳</sup>، حاجی کریمی<sup>۴</sup>

۱- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۳- گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران

۴- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

\*نویسنده مسئول: [m.tavakoli@ilam.ac.ir](mailto:m.tavakoli@ilam.ac.ir)

### چکیده

با توجه به روند گرمایش جهانی، تغییرات اقلیمی و نوسانات بارش و دما، تهدیدی جدی برای منابع آب سطحی و مدیریت پایدار آب در ایران به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند. در این راستا، این پژوهش به تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی حوزه آبخیز میمه در استان ایلام پرداخته است. برای این منظور، مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه و ترکیب مدل اقلیمی CanESM5 و مدل آماری ریزمقیاس‌گر LARS-WG تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 برای پیش‌بینی اقلیم حوضه، مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج، مدل SWAT دارای عملکرد خوبی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه بود به طوری که ضرایب NSE و R2 برای دوره واسنجی (۲۰۱۶-۲۰۱۰) به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۷۴ و اعتبارسنجی (۲۰۲۰-۲۰۱۷) به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۹۰ به دست آمد. نتایج پیش‌بینی اقلیم آینده حاکی از افزایش دما بین ۵/۲ تا ۹/۲ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش سالانه تا حدود ۱۳ درصد تحت سناریوی میانی بود. تحلیل هیدرولوژیکی نشان داد که میانگین دبی سالانه رودخانه طی دوره‌های آینده از ۵/۶۳ مترمکعب بر ثانیه به ۱/۶۱ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد و رواناب تابستانی تقریباً به صفر می‌رسد. یافته‌ها ضرورت اتخاذ راهبردهای سازگاری از جمله ذخیره‌سازی رواناب، تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی، اصلاح الگوی کشت و توسعه سامانه‌های هشدار سیلاب را تأکید می‌کند. این مطالعه با بهره‌گیری هم‌زمان از مدل‌های LARS-WG و SWAT و سناریوهای جدید IPCC، می‌تواند مبنایی علمی برای مدیریت هوشمند منابع آب و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک منطقه‌ای باشد. واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، رواناب، مدل SWAT، LARS-WG، CanESM5.

### مقدمه

گرمایش جهانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر، پدیده‌ای است که آثار آن در تمامی زیست‌بوم‌های زمین مشاهده می‌شود. روند افزایشی دمای میانگین جهانی در دهه‌های اخیر نتیجه‌ی مستقیم افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ناشی

از فعالیت‌های انسانی نظیر مصرف سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی، گسترش صنایع و تغییر کاربری اراضی است (IPCC, 2021; Mahdavi, 2001; Naderi et al., 2017). افزایش این گازها، موجب تشدید اثر گلخانه‌ای و در نتیجه برهم خوردن تعادل انرژی زمین شده است (Xu, 1999; Mansouri et al., 2014). پیامدهای این فرآیند، در قالب تغییر اقلیم نمایان می‌شود؛ پدیده‌ای که منجر به تغییرات پایدار در متغیرهای اقلیمی از جمله دما، بارش، رطوبت و فشار در مقیاس‌های زمانی بلندمدت می‌گردد (Semenov et al., 1998; Fallah Kalaki et al., 2021).

تغییر اقلیم نه تنها به عنوان یک پدیده‌ی حرارتی، بلکه به عنوان عاملی کلیدی در دگرگونی چرخه‌ی هیدرولوژیکی شناخته می‌شود. افزایش دما باعث تشدید تبخیر و تعرق، کاهش منابع آبی قابل دسترس و تغییر الگوی زمانی و مکانی بارش می‌شود که در نتیجه‌ی آن، رواناب‌های سطحی، دبی رودخانه‌ها و ذخایر زیرزمینی تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Shahouri et al., 2018; Naderi et al., 2017). این تغییرات منجر به افزایش فراوانی رخداد‌های حدی مانند سیلاب‌های ناگهانی و خشک‌سالی‌های ممتد می‌شود (Mirdashtvan et al., 2018; Shahouri et al., 2018; Ashofteh & Massah Bovandi, 2010).

برای تحلیل و پیش‌بینی این تغییرات، استفاده از مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی ضروری است. مدل‌های اقلیمی جهانی (GCMs) قادرند رفتار متغیرهای اقلیمی نظیر دما و بارش را در مقیاس کلان شبیه‌سازی کنند (Salehnia et al., 2019) اما از آنجاکه مقیاس مکانی خروجی این مدل‌ها بزرگ است، باید با روش‌های ریزمقیاس‌نمایی مانند مدل آماری LARS-WG به مقیاس محلی تبدیل شوند (Semenov et al., 1998; Noori et al., 2015). مدل LARS-WG با استفاده از داده‌های مشاهده‌شده، توزیع آماری متغیرهای اقلیمی را شبیه‌سازی کرده و سپس برای سناریوهای آینده داده‌های مصنوعی تولید می‌کند (Zheng et al., 2016; Fallah Kalaki et al., 2021). این مدل به دلیل دقت بالا و نیاز محدود به داده‌های ورودی، در مطالعات تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب بسیار پرکاربرد است (Shahouri et al., 2018; Norollahi et al., 2014). با وجود کارایی مناسب مدل LARS-WG در تولید داده‌های اقلیمی، ماهیت آن بر پایه روابط آماری داده‌های مشاهده‌ای است و برخلاف مدل‌های دینامیکی، فرآیندهای فیزیکی جو (مانند گردش عمومی جو یا بازخوردهای اقلیمی) را به‌طور صریح شبیه‌سازی نمی‌کند. همچنین فرض ایستایی روابط آماری در آینده یکی از محدودیت‌های ذاتی این مدل است، در حالی که مدل‌های دینامیکی توانایی بیشتری در بازنمایی تغییرات ساختاری اقلیم دارند. علاوه بر این دقت نتایج LARS-WG به کیفیت و طول دوره داده‌های مشاهداتی وابسته است، در حالی که روش‌های دینامیکی کمتر به داده‌های محلی متکی هستند که لازم است این موارد در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد.

پس از پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی، برای بررسی واکنش حوزه‌های آبخیز به تغییر اقلیم، از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. در این میان، مدل SWAT<sup>۱</sup> که توسط Arnold و همکاران (۱۹۹۸) توسعه یافت، یکی از مدل‌های نیمه‌توزیعی شناخته‌شده در سطح جهان است. این مدل توانایی شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند رواناب، نفوذ، تبخیر و تعرق، جریان‌های زیرسطحی و انتقال رسوب را دارد (Neitsch et al., 2011; Esmaili & Abdollahi, 2011). SWAT حوزه‌ی آبخیز را به زیرحوزه‌ها و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم می‌کند و اثر تغییرات کاربری اراضی و اقلیم را بر منابع آب ارزیابی می‌کند (Gassman et al., 2007). به دلیل انعطاف‌پذیری و دقت بالای آن، SWAT در ایران نیز برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب در حوضه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Keshavarz, 2023; Roygar, 2024; Abbaspour et al., 2015).

بر اساس نتایج مطالعات متعدد انجام‌شده در داخل و خارج از کشور، تغییر اقلیم می‌تواند منجر به کاهش رواناب سالانه، تغییر الگوی زمانی دبی رودخانه‌ها و افزایش رخداد‌های حدی هیدرولوژیکی شود (Ashofteh & Massah Bovandi, 2010). این تأثیرات در مناطق کوهستانی و خشک ایران به دلیل حساسیت بالا به تغییر دما و بارش، شدیدتر است. اکثر این مطالعات حاکی از افزایش دما، کاهش بارندگی و افت رواناب در سناریوهای آینده بوده‌اند. با این حال، بسیاری از این پژوهش‌ها بر داده‌های گزارش پنجم IPCC یعنی CMIP5 مبتنی بوده و کمتر از مدل‌های به‌روزتر گزارش ششم (CMIP6) و سناریوهای SSP استفاده کرده‌اند. افزون بر این، حوضه‌های غرب کشور، از جمله حوزه آبخیز میمه، با وجود اهمیت هیدرولوژیکی بالا، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. حوزه آبخیز میمه به دلیل

نقش حیاتی در تأمین آب کشاورزی، صنعتی و شرب استان ایلام و همچنین احداث سد بزرگ میمه بر رودخانه اصلی آن، از اهمیت راهبردی بالایی برخوردار است و تغییر در الگوی دما و بارش در این حوضه می‌تواند پیامدهای مستقیم بر عملکرد سد، منابع آب زیرزمینی و امنیت آبی منطقه داشته باشد. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر کمیت منابع آب حوزه آبخیز میمه در استان ایلام انجام شده است. در این مطالعه، از ترکیب داده‌های مدل گردش عمومی جو CanESM5 با مدل آماری LARS-WG برای تولید داده‌های اقلیمی آینده و از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی رواناب و دبی جریان استفاده شده است. نوآوری‌های پژوهش حاضر در چند بعد قابل توجه است: نخست آن که از جدیدترین نسل مدل‌های اقلیمی یعنی CanESM5 و سناریوهای SSP گزارش ششم IPCC بهره گرفته شده است که نسبت به سناریوهای قدیمی‌تر (RCP) دقت زمانی و مکانی بیشتری دارند. دوم آن که برای نخستین بار در این حوضه، مدل آماری LARS-WG با مدل فیزیکی SWAT به صورت یکپارچه ترکیب شده تا تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب با رویکرد چندمدلی ارزیابی گردد. سوم، در این تحقیق ضمن واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها با داده‌های واقعی، تغییرات فصلی و زمانی رواناب به صورت تفصیلی تحلیل شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری در مدیریت سد پایین‌دست، طراحی سازه‌های آبی و برنامه‌ریزی منابع آب منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

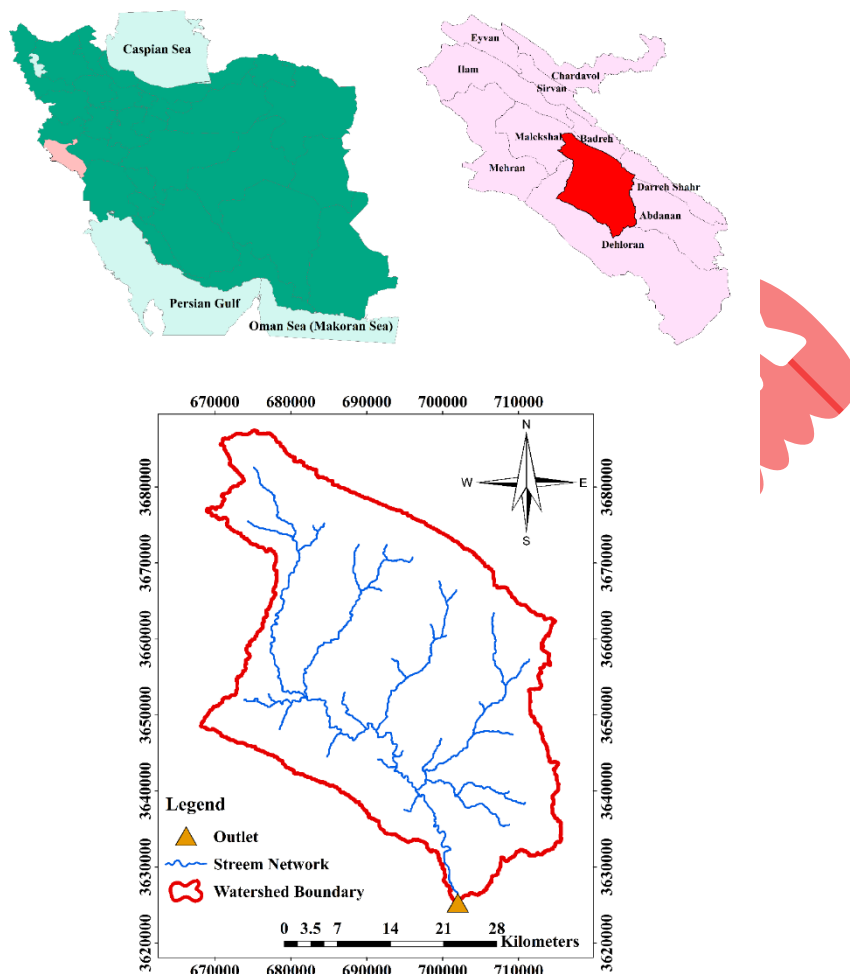
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز میمه با مساحت تقریبی ۱۶۵۹۷۵ هکتار بخشی از شهرستان دهلران را در بر می‌گیرد و در جنوب شرقی استان ایلام و در محدوده جغرافیایی  $33^{\circ} 18' 44''$  تا  $32^{\circ} 44' 44''$  عرض شمالی واقع شده است. این حوضه از شمال به حوضه سیمره، از شرق به حوضه دوپرج و از جنوب به دشت دهلران محدود می‌شود. ارتفاع حوضه از ۲۴۸۶ متر در ارتفاعات کبیرکوه تا ۲۱۶ متر در خروجی حوضه متغیر است و میانگین ارتفاع عمومی آن حدود ۱۳۵۱ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۱).

میانگین بارش سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی واقع در حوضه حدود ۴۲۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه  $25/4$  درجه سانتی‌گراد است (Ilam Regional Water Company, 2022). رژیم بارندگی در منطقه از نوع مدیترانه‌ای بوده و حدود ۸۴ درصد بارش در ماه‌های آبان تا فروردین رخ می‌دهد. رودخانه اصلی حوضه، رودخانه میمه، شاخه‌ای از سیستم آب‌های مرزی غرب کشور است که نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و شرب منطقه دارد.

از نظر زمین‌شناسی، حوضه در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد و واحدهای زمین‌شناسی سروک، ایلام، گورپی، پابده و آسماری از مهم‌ترین سازندهای آن هستند. از نظر کاربری اراضی، حدود ۹۵ درصد حوضه را اراضی مرتعی و جنگلی (عمدتاً جنگل‌های بلوط ایرانی) تشکیل داده و مابقی به زمین‌های زراعی و سکونتگاهی اختصاص دارد.



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز میمه در کشور و استان

Fig 1. Location of the Meymeh watershed in the country and the province

### مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل SWAT مدلی فیزیک‌محور و نیمه‌توزیعی است که فرآیندهای هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز را در مقیاس روزانه و بلندمدت شبیه‌سازی می‌کند. این مدل، حوضه را به زیرحوضه‌ها و سپس به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم می‌کند تا اثرات متفاوت خاک، کاربری اراضی و شیب بر فرآیند رواناب لحاظ شود (Arnold et al., 1998). یکی از پایه‌های اصلی مدل SWAT، شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه است که بر اساس معادله بیلان آب انجام می‌شود. این معادله بر اساس محاسبات مربوط به جریان سطحی، نفوذ، تبخیر و تغییرات ذخیره آب در خاک را تشکیل می‌دهد (رابطه ۱). معادله بیلان آب در SWAT به صورت زیر بیان می‌شود (Arnold et al., 1998):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - ET - W_{seep} - Q_{wg}) \quad (1)$$

که در آن  $SW_t$ : میزان رطوبت ذخیره‌شده در خاک در روز  $t$   
 $SW_0$ : میزان اولیه رطوبت خاک در ابتدای دوره شبیه‌سازی  
 $R_{day}$ : بارش روزانه

$Q_{surf}$ : رواناب سطحی روزانه  
 $ET$ : تبخیر و تعرق واقعی روزانه  
 $W_{seep}$ : مقدار نفوذ به لایه‌های زیرین خاک  
 $Q_{wg}$ : جریان پایه یا زهکشی زیرسطحی  
 همه پارامترهای فوق برحسب میلی‌متر می‌باشد.

این معادله نشان می‌دهد که تغییرات ذخیره رطوبت خاک تابع برهم‌کنش میان بارش، رواناب، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی و جریان زیرزمینی است. در واقع مدل SWAT با استفاده از این معادله قادر است چرخه کامل آب را در حوزه‌های آبخیز شبیه‌سازی کند و تأثیر عوامل مختلف مانند اقلیم، کاربری اراضی و مدیریت کشاورزی را بر تولید رواناب و منابع آب موردبررسی قرار دهد. از آنجاکه رواناب یکی از مهم‌ترین خروجی‌های مدل است، دقت در شبیه‌سازی مؤلفه‌های مؤثر بر بیلان آب، به‌ویژه تبخیر و تعرق و رواناب سطحی، نقش کلیدی در عملکرد صحیح مدل دارد. این امر به‌طور مستقیم با فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل در ارتباط است. مدل SWAT به‌منظور شبیه‌سازی رواناب سطحی، از معادلات بیلان آب و فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌کند. رواناب در این مدل عمدتاً بر اساس روش شماره منحنی (SCS-CN) محاسبه می‌شود که در آن اثر بارش، رطوبت اولیه خاک، کاربری اراضی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک در نظر گرفته می‌شود. در این روش، رواناب زمانی تولید می‌شود که میزان بارش جمعی از آستانه نگهداشت رطوبت خاک بیشتر گردد. به‌طور کلی حجم رواناب سطحی در مدل SWAT از طریق معادله SCS-CN به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۲):

$$Q_{surf} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (2)$$

که در آن:

$Q_{surf}$ : رواناب سطحی (mm)

$P$ : بارش روزانه (mm)

$I_a$ : تلفات اولیه شامل تبخیر و نفوذ اولیه (mm)

$S$ : ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک (mm) که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

در این رابطه CN عدد منحنی رواناب است که بسته به نوع کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیکی خاک و شرایط رطوبتی اولیه تعیین می‌شود (Arnold et al., 1998).

پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی و اجرای مدل SWAT، برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی، مراحل واسنجی و اعتبارسنجی انجام می‌شود. واسنجی به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن مقادیر پارامترهای حساس مدل به‌گونه‌ای تغییر داده می‌شوند تا خروجی مدل (مانند دبی جریان) بیشترین انطباق را با داده‌های مشاهداتی داشته باشد. در مرحله اعتبارسنجی نیز مدل با همان پارامترهای به‌دست‌آمده از واسنجی، برای دوره‌ای مستقل اجرا می‌شود تا میزان پایداری و تعمیم‌پذیری آن ارزیابی گردد (Arnold et al., 2012). برای انجام این مراحل، از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI-2<sup>۲</sup> استفاده شد. روش SUFI-2 یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های واسنجی است که با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی تکراری، بازه‌ای از مقادیر پارامترها را بررسی می‌کند و در هر مرحله بهترین ترکیب را برای بهبود شبیه‌سازی انتخاب می‌نماید (Abbaspour, 2015). این روش علاوه بر تخمین مقادیر بهینه، میزان عدم قطعیت مدل را نیز محاسبه کرده و با شاخص‌های آماری، دقت نتایج را گزارش می‌دهد. برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها ضریب نش - ساتکلیف<sup>۳</sup> ( $NSE$ ) و ضریب تبیین<sup>۴</sup> ( $R^2$ ) هستند.

2. Sequential Uncertainty Fitting, version 2

3. Nash-Sutcliffe Efficiency

4. Coefficient of Determination

در این تحقیق داده‌های روزانه ۲ ایستگاه سینوپتیک و ۱۶ ایستگاه باران‌سنجی داخل و اطراف حوضه در دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۰ شامل دما، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد، مورد استفاده قرار گرفت به گونه‌ای که دوره ۷ ساله ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ به عنوان دوره واسنجی و دوره ۴ ساله ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ به عنوان دوره اعتبارسنجی انتخاب شد.

### مدل ریزمقیاس گر LARS-WG و پیش‌بینی داده‌های اقلیمی

برای تحلیل اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای حوزه آبخیز میمه، با اعتماد به نتایج تحقیقات جهانی، از داده‌های مدل اقلیمی CanESM5 استفاده شد. این مدل بخشی از پروژه CMIP6 است و توسط مرکز تغییر اقلیم کانادا توسعه یافته است. CanESM5 قابلیت شبیه‌سازی چرخه کربن، اقیانوس - اتمسفر و برهم‌کنش‌های یخ - اقیانوس را دارد و در مطالعات اخیر نشان داده شده است که تطابق مناسبی با شرایط اقلیمی ایران دارد (Swart et al., 2019). به منظور برآورد شرایط آینده، دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5 در نظر گرفته شد انتخاب این دو سناریو امکان مقایسه دو روند مختلف توسعه و تغییرات اقلیمی را فراهم آورد (Tebaldi et al., 2021). سناریوی SSP1-2.6 معرف یک مسیر توسعه پایدار با کنترل شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای است که منجر به افزایش دمای کمتر و تغییرات ملایم‌تر در اقلیم خواهد شد. در مقابل SSP2-4.5، یک سناریوی میانی است که در آن میزان انتشار به صورت تدریجی افزایش یافته و شرایطی واقع‌بینانه‌تر برای بسیاری از مناطق در نظر گرفته می‌شود (IPCC, 2021). به منظور ریزگردانی داده‌های خروجی مدل اقلیمی، از مدل آماری LARS-WG بهره گرفته شد. مدل LARS-WG یک مدل آماری مبتنی بر تولید داده‌های مصنوعی روزانه‌ی اقلیمی شامل بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و تابش خورشیدی است. این مدل با استفاده از توزیع‌های احتمالاتی داده‌های گذشته، سری‌های زمانی روزانه را برای دوره‌های آبی شبیه‌سازی می‌کند (Semenov & Barrow, 1997).

در این پژوهش، ابتدا داده‌های مشاهداتی روزانه شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر و ساعت آفتابی دوره‌ی پایه (۲۰۱۹-۱۹۹۳) جمع‌آوری شده و به عنوان ورودی مدل وارد گردید. مدل سپس الگوهای آماری متغیرهای اقلیمی از جمله میانگین، انحراف معیار، ضریب چولگی و احتمال رخداد بارش متوالی را برای هر ماه محاسبه و ذخیره می‌کند. در مرحله بعد، داده‌های خروجی مدل CanESM5 تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP1-2.6 و SSP2-4.5، به عنوان ورودی مدل استفاده شد و مدل با بهره‌گیری از توزیع‌های احتمالی و روابط مشتق شده از داده‌های دوره پایه، داده‌های اقلیمی روزانه را به مقیاس محلی ریزگردانی و داده‌های روزانه‌ی پیش‌بینی شده برای دوره ۲۰۳۱-۲۰۶۰ تولید گردید (Semenov & Barrow, 1997). دقت عملکرد مدل با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده دوره پایه و داده‌های مشاهداتی با استفاده از شاخص‌های آماری RMSE،  $R^2$  و MSE ارزیابی گردید. خروجی‌های مدل شامل داده‌های روزانه بارش، دمای حداقل و حداکثر و ساعت آفتابی برای دوره‌های آینده است که می‌توانند در مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم، برنامه‌ریزی کشاورزی و مدیریت منابع آب به کار گرفته شوند (Charles et al., 2004). در این پژوهش، هرچند داده‌های این دو سناریو برای شبیه‌سازی دما و بارش به کار گرفته شد، اما برای شبیه‌سازی رواناب تنها سناریوی SSP2-4.5 استفاده گردید، زیرا این سناریو شرایطی متعادل و قابل‌اتکا برای آینده نزدیک و میان‌مدت ارائه می‌دهد.

### جمع‌آوری داده‌های موردنیاز

داده‌های موردنیاز این پژوهش به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

#### الف- داده‌های موردنیاز مدل هیدرولوژیکی SWAT

برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبخیز میمه، مدل SWAT به کار گرفته شد. داده‌های ورودی این مدل شامل موارد زیر است:

مدل ارتفاع رقومی (DEM) ۳۰ متری: جهت استخراج شبکه زهکشی، زیرحوضه‌ها و شیب که از پایگاه‌های داده جهانی تهیه و با اندازه سلول ۵۰\*۵۰m وارد مدل گردید.

نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی: برای تعیین شماره منحنی، ضریب نفوذ، تبخیر و تعرق و ضرایب رواناب که از مطالعات پیشین در حوضه تهیه و با اندازه سلول  $50 \times 50$  m وارد مدل و برای دوره آینده، ثابت فرض گردید ( Ilam Regional Water Company, 2022).

نقشه خاک: شامل ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند بافت، عمق و ظرفیت نگهداری رطوبت که از مطالعات پیشین در حوضه تهیه و با اندازه سلول  $50 \times 50$  m وارد مدل شد (Forests, Rangelands and Watershed Organization of Iran, 2011).

داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه‌های بارانسنجی و سینوپتیک: شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی که از اداره کل هواشناسی ایلام اخذ گردید.

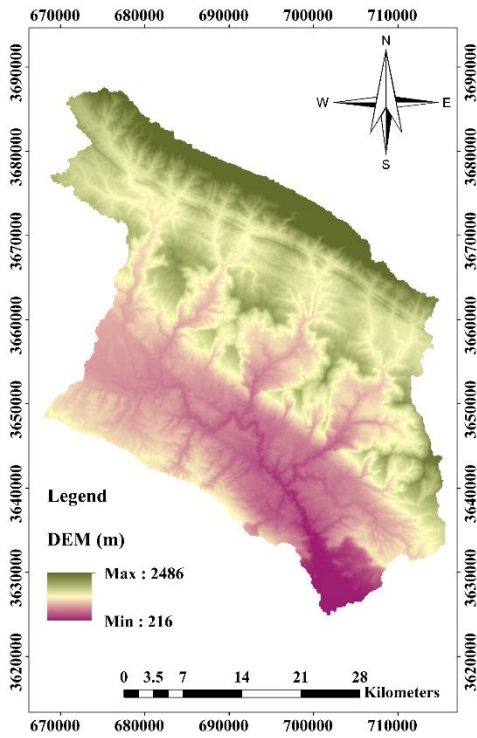
داده‌های هیدرومتری ایستگاه پل میمه: جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی SWAT که از شرکت آب منطقه‌ای ایلام اخذ گردید.

داده‌های اقلیمی روزانه که به‌عنوان ورودی این مدل برای پیش‌بینی آینده استفاده شدند، از خروجی‌های ریزمقیاس‌شده مدل LARS-WG تحت سناریوی SSP2-4.5 استخراج گردیدند. این سناریو به‌دلیل شرایط میانی و واقع‌بینانه‌تر برای آینده نزدیک و میان‌مدت و امکان مدیریت بهتر ریسک انتخاب شد (IPCC, 2021).

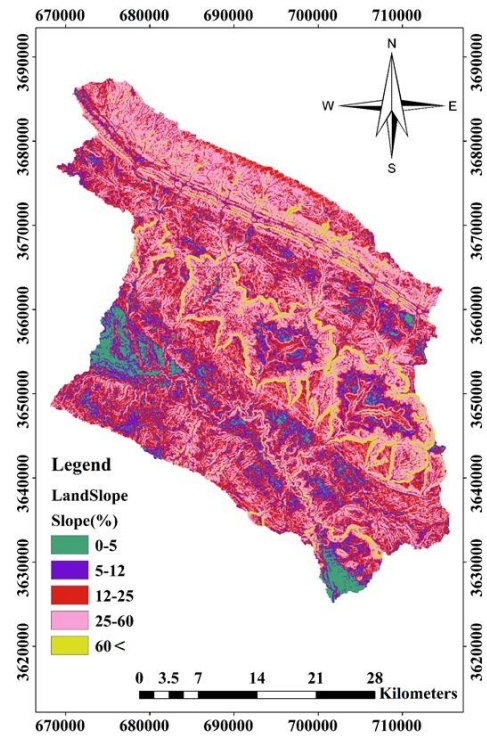
#### ب- داده‌های موردنیاز مدل ریزمقیاس‌گر LARS-WG

برای تولید داده‌های اقلیمی روزانه با قدرت تفکیک مکانی بالا، از مدل آماری LARS-WG استفاده گردید. این مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی پایه و خروجی مدل اقلیمی CanESM5 کار می‌کند. داده‌های موردنیاز آن عبارت‌اند از: داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه‌های هواشناسی منطقه شامل بارش روزانه، دمای حداقل، دمای حداکثر و ساعت آفتابی در دوره زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۹ برای آموزش و تنظیم پارامترهای مدل.

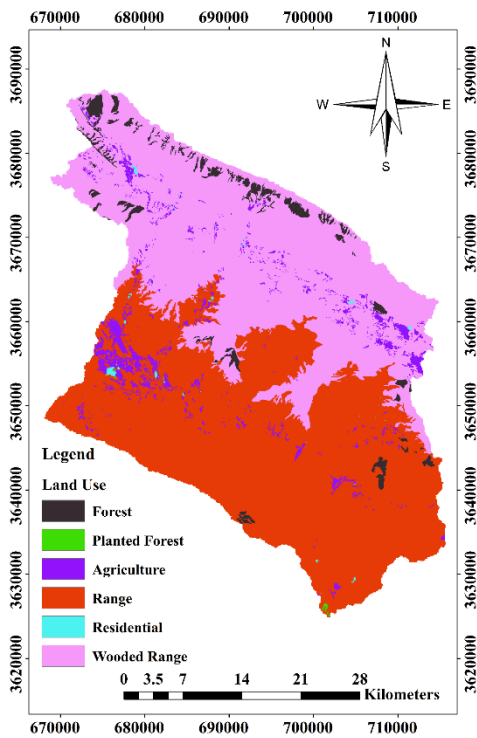
داده‌های خروجی مدل اقلیمی CanESM5 تحت سناریوی SSP2-4.5 برای تولید داده‌های آینده ( Swart et al., 2019; IPCC, 2021).



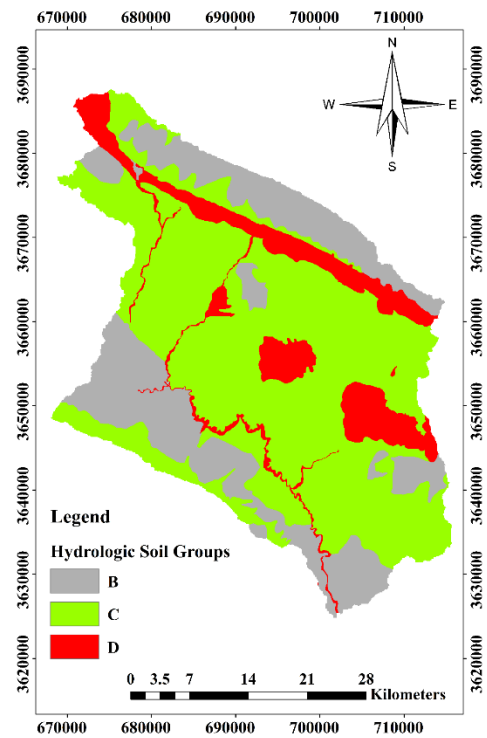
b



a



c



d

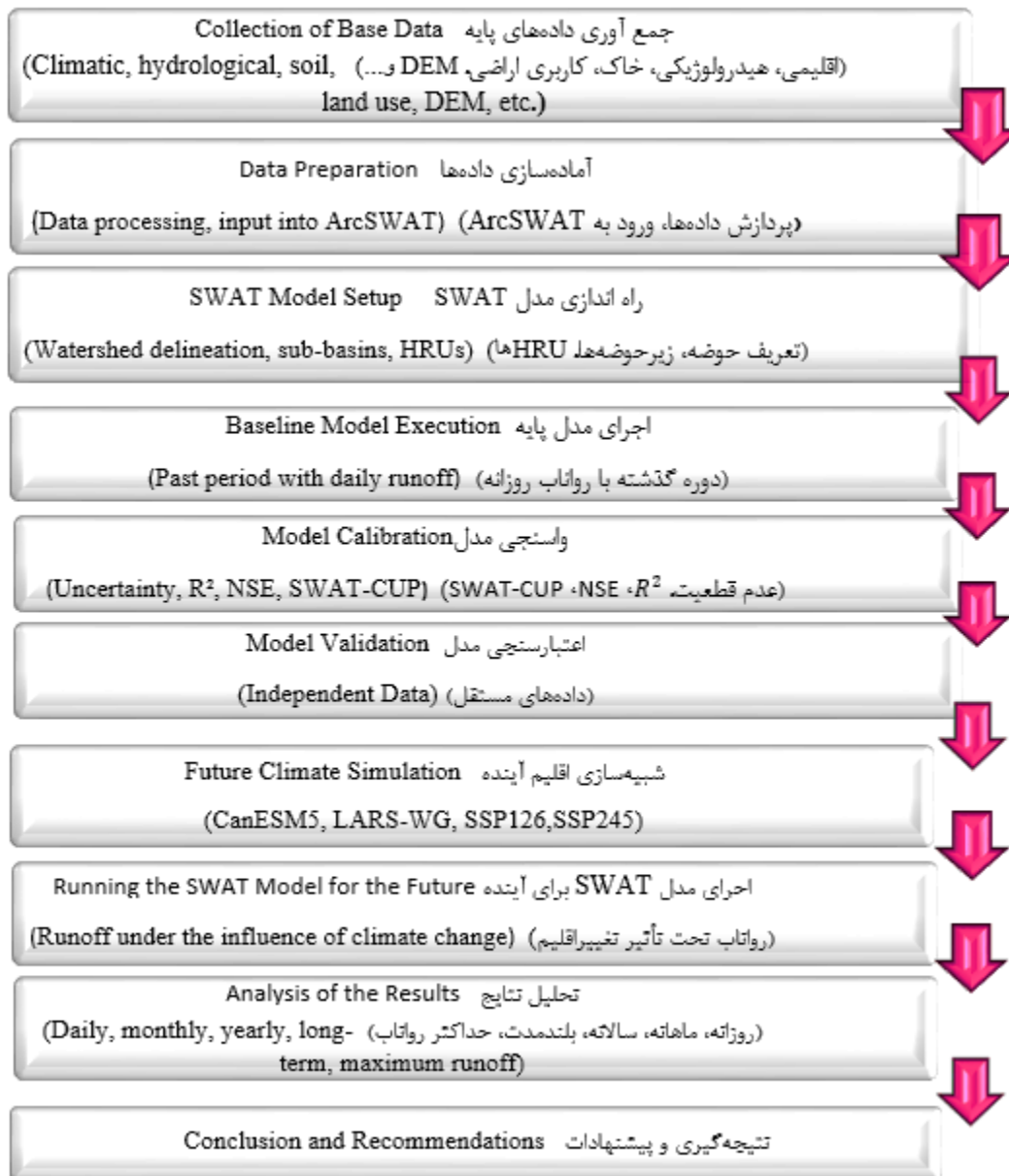
شکل ۲. نقشه‌ی رقومی ارتفاع (a)، شیب (b)، کاربری اراضی (c) و خاک (d) حوضه

Fig 2. Digital elevation map (a), slope (b), land use (c), and soil (d) of the watershed

## اجرای سناریوهای اقلیمی آینده

پس از اطمینان از صحت مدل، داده‌های ریزمقیاس‌شده‌ی حاصل از مدل LARS-WG برای دوره‌ی آینده (۲۰۳۱-۲۰۶۰) به‌عنوان ورودی جدید در مدل SWAT استفاده گردید تا تغییرات رواناب، دبی متوسط سالانه و ماهانه برای سناریوی SSP245 شبیه‌سازی شود.

دوره‌ی پایه (۲۰۱۹-۱۹۹۳) به‌عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته شد و نتایج شبیه‌سازی آینده نسبت به آن ارزیابی گردید. سپس میانگین ماهانه‌ی دما، بارش، رواناب و دبی در هر دو دوره محاسبه و تغییرات نسبی (برحسب درصد) گزارش گردید. افزون بر میانگین‌ها، تغییر در زمان و شدت رواناب حداکثر نیز تحلیل شد تا امکان شناسایی تغییر در الگوی فصلی جریان فراهم گردد. روند کلی انجام مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل انجام تحقیق  
Fig 3. Flowchart of the research steps

## نتایج و بحث

### نتایج مدل هیدرولوژیکی SWAT

در گام نخست، مدل SWAT برای دوره پایه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ و با استفاده از داده‌های اولیه اقلیمی، توپوگرافی، کاربری اراضی، خاک‌شناسی و شیب اجرا شد. در این مرحله، مدل به صورت خام و بدون هیچ‌گونه تنظیم پارامتر، رواناب روزانه حوزه آبخیز میمه را شبیه‌سازی نمود. نتایج اولیه نشان داد که همبستگی بین دبی روزانه شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی پایین است و مدل در بازتولید رواناب سطحی عملکرد ضعیفی دارد. به طور خاص، مقادیر شاخص‌های آماری در اجرای اولیه کمتر از حد قابل قبول بودند؛ به طوری که ضریب  $R^2$  حدود ۰/۲۱ و ضریب نش-ساتکلیف حدود ۰/۱۸ برآورد شد. این مقادیر بیانگر انحراف قابل توجه مدل از داده‌های واقعی و ضعف آن در بازنمایی فرآیندهای هیدرولوژیکی بودند؛ بنابراین، فرآیند واسنجی برای تنظیم پارامترهای کلیدی و بهبود دقت شبیه‌سازی ضروری تشخیص داده شد.

در مرحله واسنجی، از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش بهینه‌سازی SUFI-2 استفاده شد تا با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های واقعی، مقادیر بهینه پارامترها تعیین گردد. برای این منظور، دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ به عنوان دوره واسنجی و ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ برای اعتبارسنجی انتخاب شد. نتایج واسنجی بر اساس داده‌های روزانه نشان داد که تنظیم پارامترها سبب بهبود قابل ملاحظه عملکرد مدل شده است. مقدار ضریب  $R^2$  برابر با ۰/۷۴ و ضریب NSE برابر با ۰/۷۲ نشان‌دهنده افزایش همبستگی و کاهش خطای شبیه‌سازی است. در این مرحله، منحنی جریان شبیه‌سازی شده در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، تطابق مناسبی نشان داد و مدل توانست نوسانات فصلی و پیک‌های سیلابی را با دقت بالا بازتولید کند.

برای بررسی عدم قطعیت داده‌های شبیه‌سازی شده دبی، نرم‌افزار SWAT-CUP دو شاخص P و R را ارائه می‌دهد مقدار P بیانگر درصد داده‌های مشاهداتی است که در باند عدم قطعیت (95PPU) مدل قرار می‌گیرند و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده پوشش بهتر عدم قطعیت است. همچنین R که پهنای باند عدم قطعیت را نسبت به انحراف معیار داده‌ها نشان می‌دهد، هرچه به عدد صفر نزدیک‌تر باشد معرف دقت بیشتر مدل است. شاخص‌های عدم قطعیت مدل بیانگر کیفیت مناسب خروجی‌ها بودند؛ به طوری که P-Factor برابر با ۰/۸۴ و R-Factor برابر با ۱/۲۴ نشان دادند بیش از ۸۰ درصد داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت مدل قرار گرفته‌اند. این نتایج تأیید کرد که فرآیند واسنجی توانسته است پارامترهای مؤثر را به درستی شناسایی و اصلاح نماید.

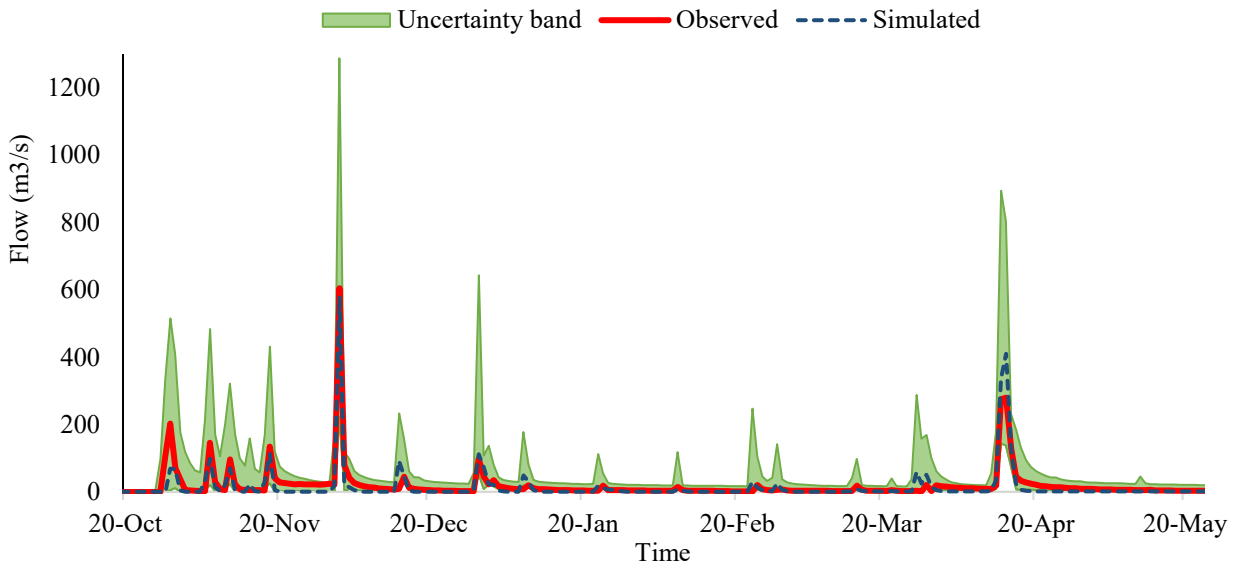
در مرحله اعتبارسنجی، از همان مجموعه پارامترهای بهینه‌شده استفاده شد تا پایداری مدل در بازه مستقل ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ ارزیابی گردد. نتایج نشان داد که مدل SWAT در این دوره نیز دقت بالایی دارد؛ به گونه‌ای که ضریب تبیین به ۰/۹۰ و شاخص نش-ساتکلیف به ۰/۸۷ افزایش یافت. بدین معنا که مدل قادر بوده است بیش از ۸۷ درصد تغییرات دبی جریان را بازتولید کند و رفتار زمانی رواناب را به خوبی شبیه‌سازی نماید. هرچند در رخداد‌های اوج جریان اختلاف‌هایی مشاهده شد، اما در مجموع مدل از پایداری و قابلیت تعمیم قابل قبولی برخوردار بود.

تحلیل حساسیت مدل نیز نشان داد که از میان پارامترهای متعدد، شماره منحنی (CN2) بیشترین تأثیر را بر رواناب دارد. پس از آن پارامترهای هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه (CH-K2)، ضریب زبری بستر آبراهه (CH-N2) و ضریب پایه جریان (ALPHA-B) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این یافته‌ها بیانگر نقش غالب فرآیندهای سطحی و انتقال جریان در شکل‌گیری رواناب حوضه هستند. در مجموع، مدل SWAT پس از واسنجی دقیق توانست خطای شبیه‌سازی را به میزان چشمگیری کاهش دهد و رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز میمه را با دقت بالا بازنمایی کند. مقادیر بالای  $R^2$  و NSE در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی، همراه با شاخص‌های مناسب عدم قطعیت، نشان‌دهنده قابلیت اعتماد مدل در پیش‌بینی رواناب و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی در آینده است. در مقایسه با پژوهش‌های مشابه، از جمله مطالعه شهری و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه ورامین، نتایج حاضر از کارایی قابل اعتماد مدل SWAT در شرایط اقلیمی ایران حمایت می‌کند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که مدل مذکور ابزار مناسبی برای پیش‌بینی پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییر اقلیم در مقیاس‌های حوضه‌ای است.

جدول ۱. شاخص‌های آماری واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

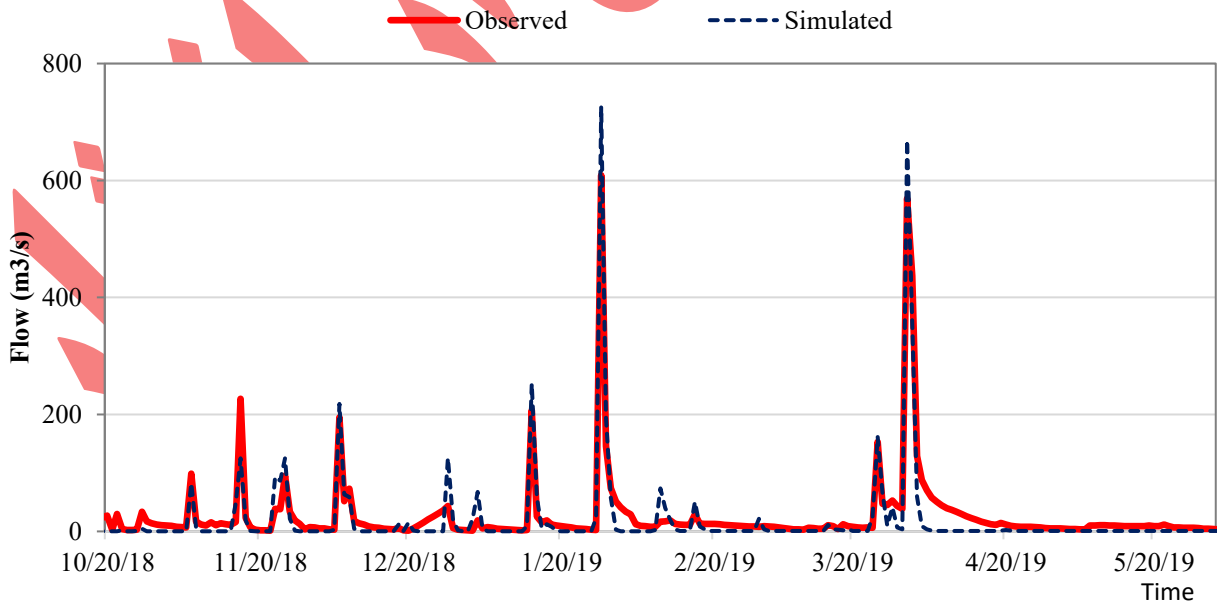
**Table 1. Statistical indices for SWAT model calibration and validation**

مرحله (Stage)	بازه زمانی (Time)	R <sup>2</sup>	NSE	عملکرد مدل (Model evaluation)
اجرای اولیه (First run)	2010-2020	0.21	0.18	ضعیف (Weak)
واسنجی (Calibration)	2010-2016	0.72	0.74	بسیار خوب (Very good)
اعتبارسنجی (Validation)	2017-2020	0.90	0.87	بسیار خوب (Very good)



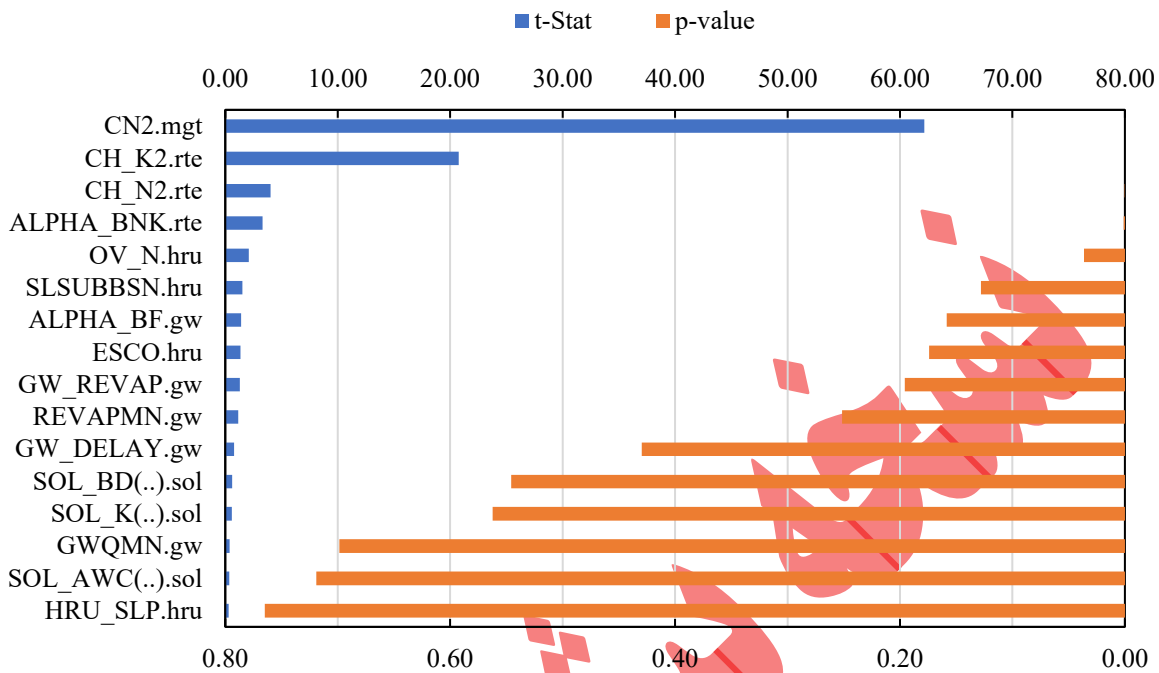
شکل ۴. نمایشی از شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل SWAT در دوره واسنجی

**Fig 4. Representation of SWAT model hydrological simulation during the calibration period**



شکل ۵. نمایشی از شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل SWAT در دوره اعتبارسنجی

**Fig 5. Representation of SWAT model hydrological simulation during the validation period**



شکل ۶. نمودار حساسیت سنجی پارامترها برای شبیه‌سازی رواناب با استفاده از شاخص‌های t-stat و p-value  
**Fig 6. Parameter sensitivity analysis chart for runoff simulation using p-value and t-stat statistics**

### نتایج پیش‌بینی اقلیمی مدل LARS-WG و داده‌های CanESM5

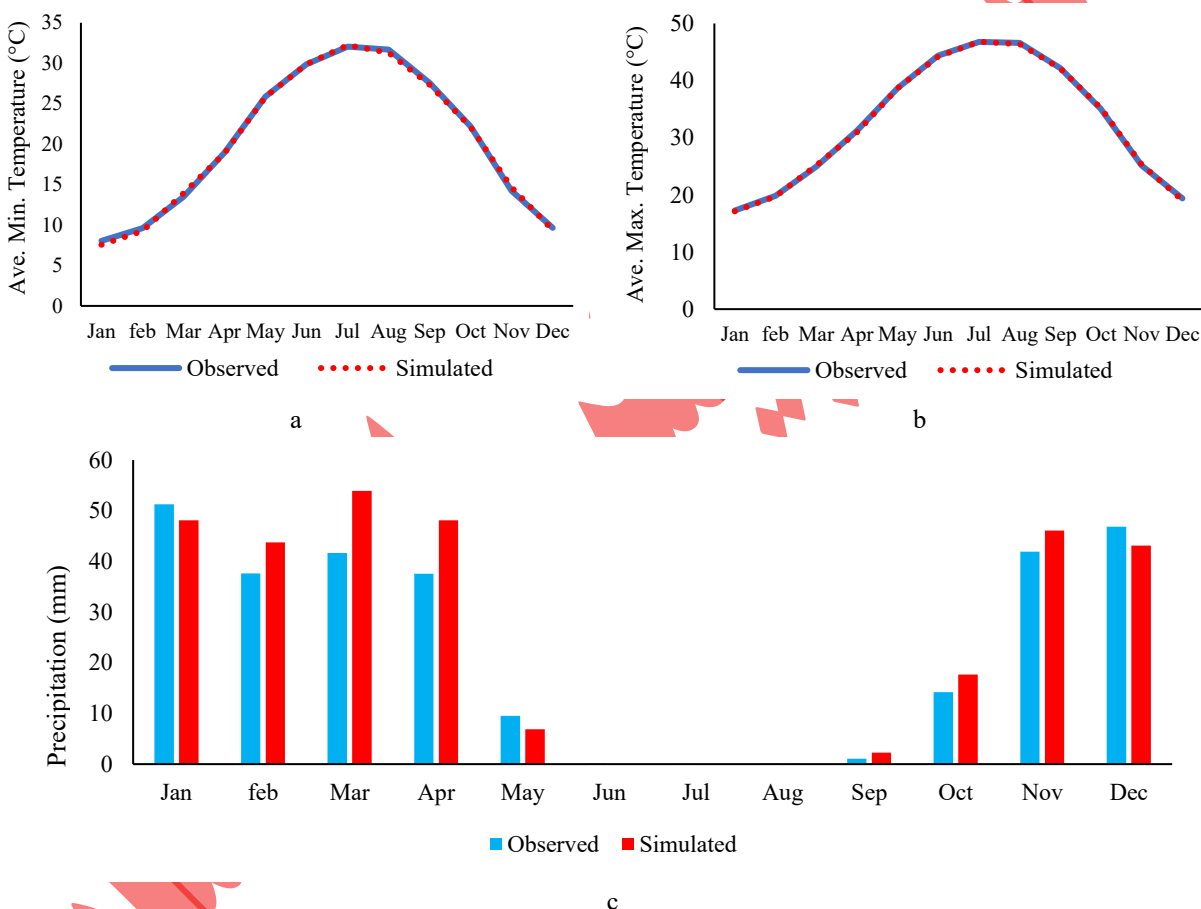
نتایج حاصل از استخراج و تحلیل داده‌های اقلیمی آینده برای منطقه دهلران با استفاده از مدل LARS-WG-8 و خروجی مدل اقلیمی CanESM5 در دو سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP1-2.6 و SSP2-4.5، تصویری دقیق از روند تغییرات دما و بارش در افق زمانی ۲۰۶۰-۲۰۳۱ ارائه می‌دهد. در نخستین مرحله، مدل برای دوره مشاهداتی ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۹ اجرا شد که نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری نشان داد که عملکرد مدل در بازتولید الگوهای مکانی-زمانی بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در منطقه دهلران در مجموع قابل قبول بوده؛ به‌گونه‌ای که برای پارامترهای دمایی (حداقل و حداکثر) عملکرد مدل به‌مراتب بهتر و دقت بالاتری نسبت به شبیه‌سازی بارش مشاهده شد. مقادیر به‌دست‌آمده از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل مؤید دقت قابل قبول شبیه‌سازی داده‌های بارشی و دقت بالای شبیه‌سازی داده‌های دمایی است. ضریب تبیین ( $R^2$ ) حاکی از وجود همبستگی قوی بین مقادیر مشاهداتی و خروجی‌های مدل برای تمامی سه پارامتر مورد مطالعه است. همچنین مقادیر RMSE و MSE ارائه شده (جدول ۲)، خطای مدل را در محدوده قابل قبولی برای پارامتر بارش و در سطح بسیار پایینی برای دمای حداقل و حداکثر نشان می‌دهند؛ بنابراین، مدل مورد ارزیابی از دقت لازم در بازتولید داده‌های اقلیمی، به‌ویژه متغیرهای دمایی، در منطقه مورد مطالعه برخوردار می‌باشد.

ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای هر دو پارامتر دمای حداقل و حداکثر برابر با ۰/۹۹ بوده و مقادیر RMSE برابر با ۰/۲۹۶ درجه سانتی‌گراد به دست آمد که بیانگر دقت بسیار بالا و خطای اندک مدل در شبیه‌سازی دما است. در مقابل، عملکرد مدل برای بارش ضعیف‌تر ولی همچنان قابل قبول ارزیابی شد؛ به‌گونه‌ای که مقدار  $R^2$  برای بارش برابر با ۰/۹۵ و RMSE معادل ۵/۴۶ میلی‌متر گزارش گردید. این اختلاف عملکرد بین دما و بارش به دلیل ماهیت متغیر و ناهمگن بارش در مقیاس مکانی و زمانی است. باین‌وجود، تحلیل‌های آماری نشان دادند که مدل قابلیت اعتماد مناسبی برای شبیه‌سازی اقلیم منطقه دارد.

جدول ۲. تغییرات پیش‌بینی شده پارامترهای اقلیمی در دو سناریوی SSP126 و SSP245

Table 2. Predicted changes in climatic parameters under SSP126 and SSP245 scenarios

پارامتر (Parameter)	دوره پایه (Base time period)	میزان تغییرات در هر سناریو (Changes in Scenarios)			
		SSP126	SSP245	SSP126	SSP245
دمای متوسط سالانه (°C) (Annual mean temperature)	26.43	28.97	29.3	+2.54	+2.87
بارش سالانه (mm) (Annual mean precipitation)	282.65	327.96	245.68	+16%	-13.1%



شکل ۷. نتایج مدل LARS-WG-8 برای پارامترهای دمای حداقل (الف) دمای حداکثر (ب) و بارش (ج) دوره مشاهداتی (۱۹۹۳-۲۰۱۹) در ایستگاه دهلران

Fig 7. LARS-WG-8 model results for minimum temperature (a), maximum temperature (b), and precipitation (c) during the observational period (1993–2019) at Dehloran station

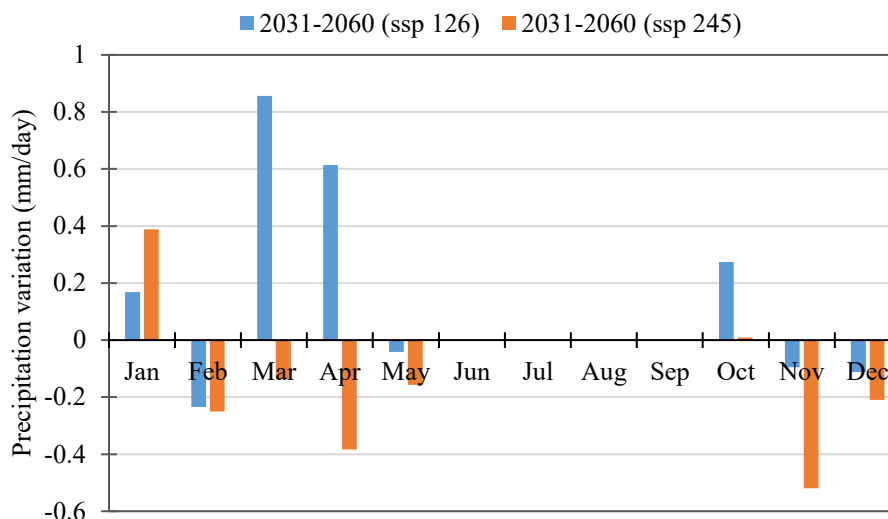
در گام بعد، شبیه‌سازی آینده اقلیم دهلران برای دوره ۲۰۳۱-۲۰۶۰ میلادی انجام شد. نتایج تغییرات ماهانه بارندگی (شکل ۸) نشان داد که تحت سناریوی SSP1-2.6، برخی ماه‌های سال شاهد کاهش بارندگی خواهند بود، اما در ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل و اکتبر افزایش خفیفی به میزان ۰/۱۶، ۰/۸۵ و ۰/۶۱ و ۰/۲۷ میلی‌متر در روز مشاهده می‌شود. برخلاف آن، سناریوی SSP2-4.5 روند کاهشی شدیدتری را در اغلب ماه‌ها نشان می‌دهد، به‌ویژه در ماه نوامبر که بیشترین افت بارندگی به میزان ۰/۵۱ میلی‌متر در

روز پیش‌بینی شده است. در مقیاس سالانه، میانگین بارندگی تحت SSP1-2.6 حدود ۱۶ درصد افزایش و تحت SSP2-4.5 حدود ۱۳/۱ درصد کاهش نسبت به دوره مشاهداتی نشان داده است.

در تحلیل فصلی بارش، سناریوی SSP1-2.6 روند افزایشی در اغلب فصول سال به جز زمستان نشان می‌دهد. بیشترین افزایش در فصل بهار با مقدار ۰/۴۷ میلی‌متر در روز گزارش شده است. در حالی که در سناریوی SSP2-4.5، دو فصل بهار و پاییز با کاهش بارش مواجه خواهند بود و بیشترین کاهش بهار با مقدار ۰/۲۲ میلی‌متر در روز است. هر دو سناریو در فصل تابستان تغییر معناداری در بارش نشان نمی‌دهند که بیانگر ثبات نسبی بارش تابستانی است.

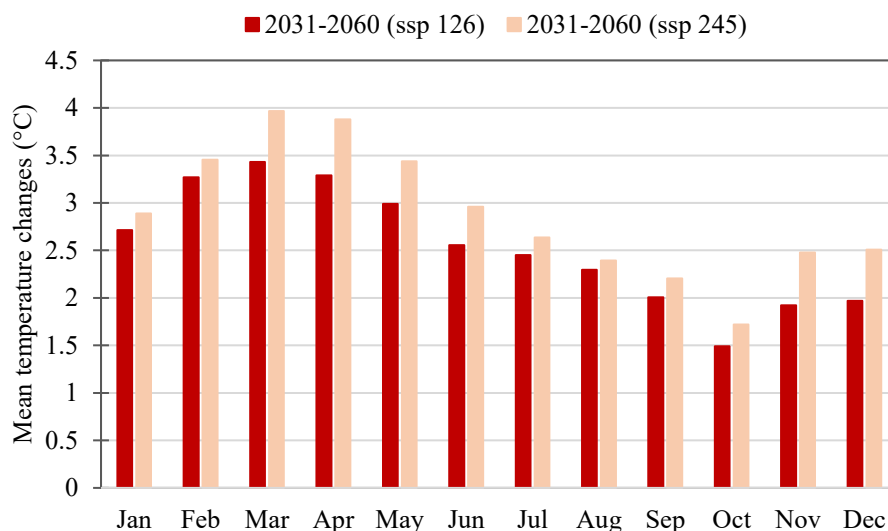
نتایج تحلیل بلندمدت بارندگی نشان می‌دهد که در سناریوی SSP1-2.6، در ۱۶ سال از دوره مورد مطالعه افزایش بارش و در ۱۴ سال کاهش بارش رخ می‌دهد. بیشترین افزایش سال ۲۰۴۶ با ۱/۰۴ میلی‌متر در روز و بیشترین کاهش سال ۲۰۴۲ با ۰/۳۱ میلی‌متر در روز است. میانگین سالانه بارش در این سناریو حدود ۳۲۷/۹ میلی‌متر برآورد شده که نسبت به دوره پایه ۴۵/۳ میلی‌متر افزایش دارد؛ اما در سناریوی SSP2-4.5، ۲۱ سال از دوره آتی شاهد کاهش بارش خواهند بود و تنها در سال‌هایی محدود مانند ۲۰۲۶ (افزایش ۰/۵۵ میلی‌متر در روز) افزایش مشاهده می‌شود. میانگین سالانه بارش در این سناریو به ۲۸۹/۹ میلی‌متر کاهش یافته است. از نظر دمایی (شکل ۹)، هر دو سناریو نشان‌دهنده افزایش قابل توجه دما در آینده هستند. میانگین دمای سطحی در دوره ۲۰۶۰-۲۰۳۱ تحت SSP1-2.6 به میزان ۲/۵ درجه سانتی‌گراد (معادل ۹/۵ درصد) و تحت SSP2-4.5 به میزان ۲/۹ درجه سانتی‌گراد (معادل ۱۰/۸ درصد) افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش ماهانه دما در ماه مارس مشاهده می‌شود که به ترتیب ۳/۴ و ۳/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش نسبت به دوره پایه دارد. بررسی فصلی نیز نشان می‌دهد که دمای فصل بهار بیشترین میزان افزایش را دارد؛ به گونه‌ای که در SSP1-2.6، افزایش ۳/۲ درجه و در SSP2-4.5، افزایش ۳/۸ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. همچنین، نتایج بلندمدت دمای سالانه نشان می‌دهد که تحت SSP1-2.6، میانگین دمای سالانه به ۲۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که ۲/۵ درجه بالاتر از میانگین دوره پایه است. در سناریوی SSP2-4.5، این افزایش شدیدتر و به حدود ۳/۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. بیشترین افزایش دما در سال ۲۰۵۰ ثبت شده است.

به‌طور کلی، نتایج تحلیل نشان می‌دهد که مدل LARS-WG-8 پس از واسنجی عملکرد قابل قبولی در بازتولید اقلیم منطقه دهلران داشته و پیش‌بینی‌ها حاکی از روند گرمایش قابل توجه و تغییر در الگوی بارش، به‌ویژه در فصول بهار و پاییز است. این تغییرات می‌تواند پیامدهای مهمی برای منابع آب، کشاورزی و زیست‌محیطی منطقه داشته باشد و لزوم اتخاذ راهبردهای سازگاری با اقلیم آینده را تقویت می‌کند. مقایسه با پژوهش Akhavan Farshi (2024) نیز صحت این مدل در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی آینده را تأیید می‌کند. این هم‌خوانی میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های مشاهداتی، پایه‌ای معتبر برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر بیلان آبی منطقه فراهم کرده است. یافته‌های مربوط به روند تغییرات بارش در این پژوهش نیز با نتایج تحقیقات مشابه همچون مطالعات (Tavakoli and De Smedt (2011)، Behzadi et al. (2013)، Bahri & Zahedi (2016) و Fakhri Fard et al. (2013) همسو است، هر چند تفاوت‌هایی در شدت تغییرات وجود دارد که می‌تواند ناشی از شرایط محلی و مدل‌های اقلیمی مورد استفاده باشد. در مجموع، کاهش بارش در کنار افزایش نوسانات فصلی، نشانگر افزایش ناپایداری اقلیمی و خطرپذیری بیشتر منطقه در برابر خشکسالی و سیلاب‌های ناگهانی است. همچنین یافته‌های این پژوهش در زمینه روند افزایشی دما با نتایج مطالعات جهانی از جمله Choi (2008) و Daba & Mamo (2013) همخوانی دارد و بیانگر تداوم گرمایش تدریجی در منطقه است.



شکل ۸. میزان تغییرات بارندگی ماهانه (mm/day) تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 در بازه زمانی ۲۰۳۱-۲۰۶۰ میلادی نسبت به دوره مشاهداتی در ایستگاه دهلران

Fig 8. Monthly precipitation changes (mm/day) under SSP1-2.6 and SSP2-4.5 scenarios for 2031–2060 relative to the observational period at Dehloran station



شکل ۹. میانگین تغییرات دما تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 در ایستگاه دهلران

Fig 9. Average temperature changes under SSP1-2.6 and SSP2-4.5 scenarios at Dehloran station

نتایج پیش‌بینی هیدرولوژیکی آینده با مدل SWAT و تحلیل زمانی تغییرات رواناب

با وجود پیش‌بینی داده‌های اقلیمی با دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5، داده‌های اقلیمی روزانه که به‌عنوان ورودی مدل SWAT برای پیش‌بینی هیدرولوژیکی آینده استفاده شدند، از خروجی‌های ریزمقیاس‌شده مدل LARS-WG تحت سناریوی SSP2-4.5 استخراج گردیدند. این سناریو به‌دلیل شرایط میانی و واقع‌بینانه‌تر برای آینده نزدیک و میان‌مدت انتخاب شد (IPCC, 2021). نتایج حاصل از برآورد رواناب آینده با استفاده از مدل SWAT و سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی پیش‌رو

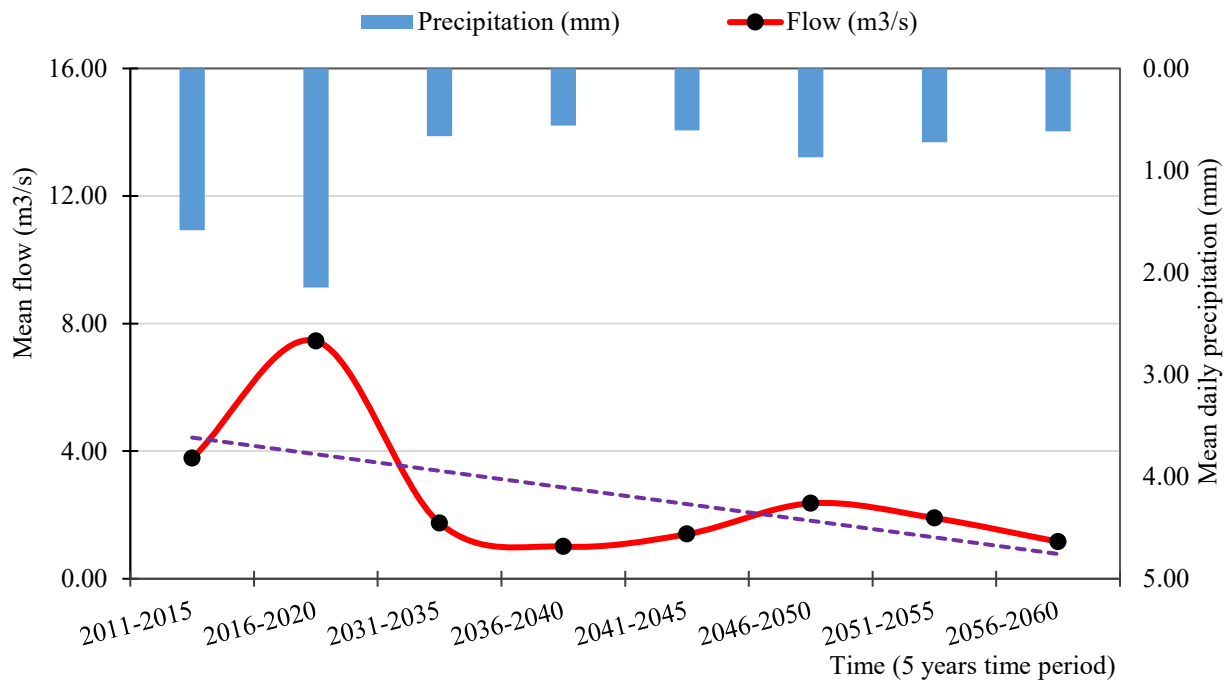
تأثیر عمیقی بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه دارد و الگوی بارش، دما و جریان رودخانه در دهه‌های آتی دچار نوسانات و کاهش محسوسی خواهد شد. بر اساس داده‌های حاصل از مدل CanESM5 برای دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۶۱، پیش‌بینی می‌شود که میانگین بارش و در نتیجه رواناب سالانه کاهش چشمگیری نسبت به دوره پایه (۲۰۱۱-۲۰۲۰) داشته باشد. در دوره پایه، دبی رودخانه از میانگین ۳/۷۸ مترمکعب بر ثانیه در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۵ به ۷/۴۵ مترمکعب بر ثانیه در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۶ افزایش یافته است که هم‌زمان با افزایش بارش متوسط روزانه از ۱/۵۹ به ۲/۱۵ میلی‌متر بوده است. این همبستگی مثبت میان بارش و دبی، بیانگر نقش مستقیم بارش در کنترل جریان رودخانه است. با ورود به دوره آینده، روند تغییرات به‌طور قابل توجهی نزولی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که دبی متوسط در بازه ۲۰۳۱-۲۰۳۵ به ۱/۷۴ و در ۲۰۴۰-۲۰۳۶ به حداقل مقدار خود یعنی ۱/۰۱ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. به‌موازات آن، میانگین بارش روزانه نیز از ۰/۶۶ به ۰/۵۶ میلی‌متر کاهش می‌یابد. هرچند در میانه دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۴۱) افزایش نسبی تا حدود ۲/۳۷ مترمکعب بر ثانیه در دبی و ۰/۸۷ میلی‌متر در بارش دیده می‌شود، اما در مجموع روند کلی نزولی و همراه با افت شدید نسبت به دوره پایه است. در انتهای بازه پیش‌بینی (۲۰۶۰-۲۰۵۱)، مقادیر به ترتیب به ۱/۱۶ مترمکعب بر ثانیه برای دبی و ۰/۶۲ میلی‌متر برای بارش کاهش می‌یابند. این کاهش مستمر به‌روشنی بیانگر کاهش توان تولید رواناب و احتمال بروز خشکسالی‌های مکرر در آینده است (شکل ۱۰).

تحلیل میانگین دبی حداکثر سالانه نیز این روند را تأیید می‌کند. در دوره پایه، مقدار میانگین دبی حداکثر از ۲۴۰/۷ به ۳۴۸ مترمکعب بر ثانیه افزایش داشته است، در حالی که در دوره آینده مقدار آن در شروع دوره به ۱۵۶/۳ مترمکعب بر ثانیه و در میانه آن به حداقل ۷۶/۷ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد. حتی در سال‌های ۲۰۵۰-۲۰۴۶ که افزایش نسبی تا ۲۰۳/۴ مترمکعب بر ثانیه دیده می‌شود، مقدار آن هنوز حدود ۴۰ درصد پایین‌تر از دوره پایه است. در انتهای دوره (۲۰۶۰-۲۰۵۰)، مقدار دبی حداکثر به ۵۶/۵ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد که بیانگر کاهش ۷۰ تا ۸۰ درصدی نسبت به شرایط کنونی است. روند مشابهی در بارش بیشینه سالانه مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که میانگین بارش بیشینه از ۷۲/۲ و ۱۰۲/۷ میلی‌متر در دوره پایه به حدود ۳۱/۶ تا ۵۷/۸ میلی‌متر در آینده کاهش می‌یابد. این همبستگی مثبت میان کاهش بارش‌های شدید و افت دبی‌های پیک نشان می‌دهد که احتمال وقوع سیلاب‌های بزرگ کمتر می‌شود، اما این کاهش هم‌زمان، نشانه کاهش تغذیه طبیعی رودخانه و کاهش توان ذخیره آب سطحی است. در بازه بلندمدت ۲۰۱۰ تا ۲۰۶۰، تحلیل همبستگی داده‌های بارش و دبی سالانه نشان می‌دهد که این دو پارامتر ارتباطی مستقیم و مثبت دارند. سال‌هایی که بارش بالاتر بوده، مانند ۲۰۱۹ با ۲/۹۹ میلی‌متر بارش متوسط روزانه، بیشینه دبی متوسط سالانه (۱۳/۵ مترمکعب بر ثانیه) بوده است؛ اما در دوره آینده، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۳۷ و ۲۰۴۲، بارش متوسط روزانه به حدود ۰/۴۳ و ۰/۳۳ میلی‌متر کاهش یافته و دبی نیز به کمترین مقادیر خود رسیده است. روند کلی بیانگر آن است که نوسانات جریان سالانه در آینده کمتر و شدت پیک‌ها محدودتر می‌شود. این موضوع از یک‌سو احتمال بروز سیلاب را کاهش می‌دهد، ولی از سوی دیگر به معنی کاهش جریان‌های تغذیه‌ای و افزایش خطر کم‌آبی در فصول خشک است (شکل ۱۱).

بررسی الگوی دبی ماهانه بین دو دوره پایه و آینده نشان می‌دهد که تغییرات فصلی شدت بیشتری خواهد یافت. در دوره پایه، بیشترین دبی در ماه‌های زمستان و بهار (ژانویه تا آوریل) با مقادیر ۸/۱۸ تا ۱۰/۵۲ مترمکعب بر ثانیه مشاهده می‌شود، در حالی که در تابستان تا حدود ۰/۴۷ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد؛ اما در آینده، همین ماه‌ها تنها بین ۲/۳۵ تا ۶/۲۷ مترمکعب بر ثانیه جریان خواهند داشت و در تابستان (ژوئیه و اوت) جریان به کلی خشک می‌شود. میانگین سالانه دبی از ۵/۶۳ مترمکعب بر ثانیه در دوره پایه به ۱/۶۱ مترمکعب بر ثانیه در آینده کاهش می‌یابد که حدوداً معادل کاهش ۷۰ درصدی است. این روند کاهش شدید جریان‌های تابستانی، نشان‌دهنده احتمال خشکی کامل بستر رودخانه در برخی ماه‌ها است که پیامدهایی جدی برای کشاورزی و اکوسیستم آبی در پی خواهد داشت (شکل ۱۲).

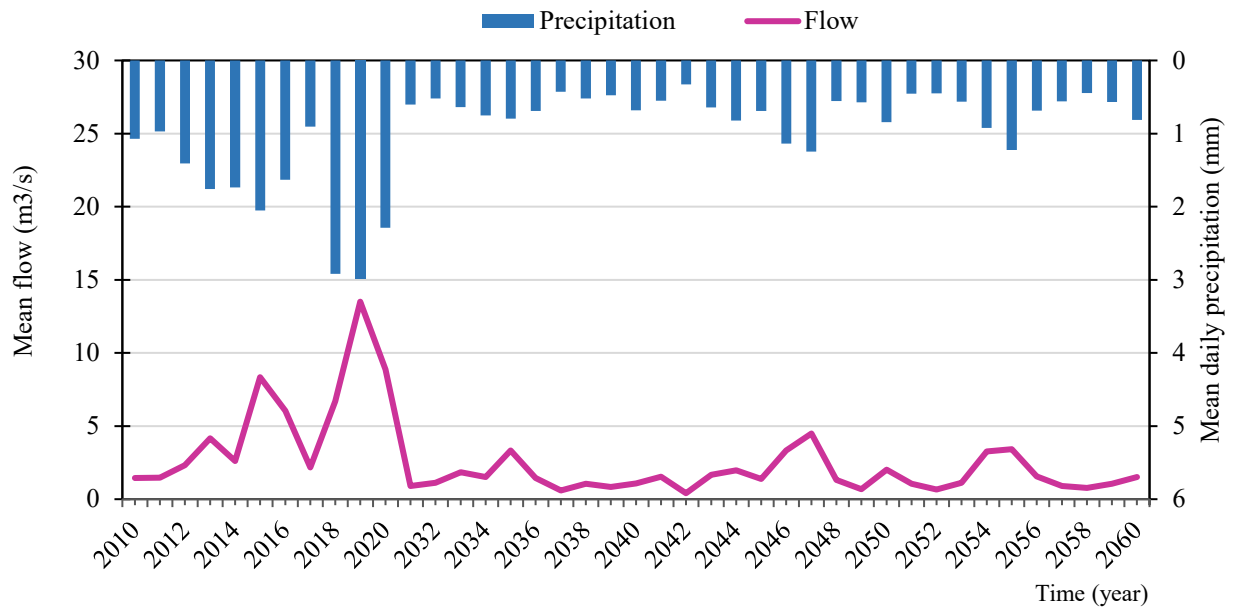
درنهایت، بررسی نقش دما نشان داد که افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر، عامل تقویت‌کننده کاهش رواناب است. در حالی که در دوره‌های پایه میانگین دمای حداقل بین ۱۷/۷۱ تا ۱۸/۷۹ و دمای حداکثر بین ۲۶/۸۶ تا ۲۷/۹۳ درجه سانتی‌گراد بوده، در دوره‌های آینده این مقادیر به بیش از ۲۰/۹۴ و ۲۹/۳۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این افزایش دما موجب افزایش تبخیر و تعرق و

کاهش رطوبت خاک شده است؛ در نتیجه حتی در دوره‌هایی با بارش مناسب، رواناب به دلیل اتلاف بیشتر آب کاهش یافته است. به‌طور کلی، نتایج این بخش بیانگر آن است که تغییرات اقلیمی آبی، از طریق کاهش بارش و افزایش دما، موجب افت چشمگیر جریان‌های سطحی و تشدید کم‌آبی در حوضه میمه-دهلران خواهد شد. این وضعیت، ضرورت مدیریت هوشمند منابع آب، ذخیره‌سازی فصلی و برنامه‌ریزی جامع برای مقابله با خشکسالی‌های آینده را بیش‌ازپیش برجسته می‌کند. به‌طور کلی شبیه‌سازی بیلان آبی با استفاده از مدل SWAT تحت سناریوی SSP2-4.5 بیانگر کاهش قابل‌توجه رواناب سطحی در دوره آبی است. به طوری که کاهش دبی در ماه‌های آوریل و مارس بیش از سایر ماه‌ها بوده و در تابستان رواناب تقریباً به صفر می‌رسد. این تغییرات نتیجه ترکیب دو عامل اصلی است: کاهش بارش‌های مؤثر و افزایش دما. مقایسه نتایج با پژوهش‌های پیشین همچون مطالعات Azari et al. (2013) و Nourollahi (2013) و Tavakoli and De Smedt (2011) نشان می‌دهد که کاهش رواناب در اثر گرمایش جهانی روندی عمومی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و یافته‌های این پژوهش از این قاعده مستثنا نیست. کاهش رواناب سطحی علاوه بر تهدید منابع آبی جاری، بر تغذیه آبخوان‌های زیرزمینی نیز اثر منفی دارد. در حوضه‌های نیمه‌خشک مانند میمه دهلران که وابستگی بالایی به منابع زیرزمینی دارند، این موضوع می‌تواند منجر به افت سطح ایستابی، افزایش شوری و کاهش کیفیت آب شود. از سوی دیگر، افزایش نوسانات بارش و وقوع رخداد‌های شدید در بازه‌های کوتاه می‌تواند به بروز سیلاب‌های ناگهانی منجر گردد. چنین رویدادهایی نه تنها منبعی مؤثر برای تغذیه سفره‌های زیرزمینی نیستند، بلکه باعث فرسایش خاک و تخریب زیرساخت‌ها نیز می‌شوند.

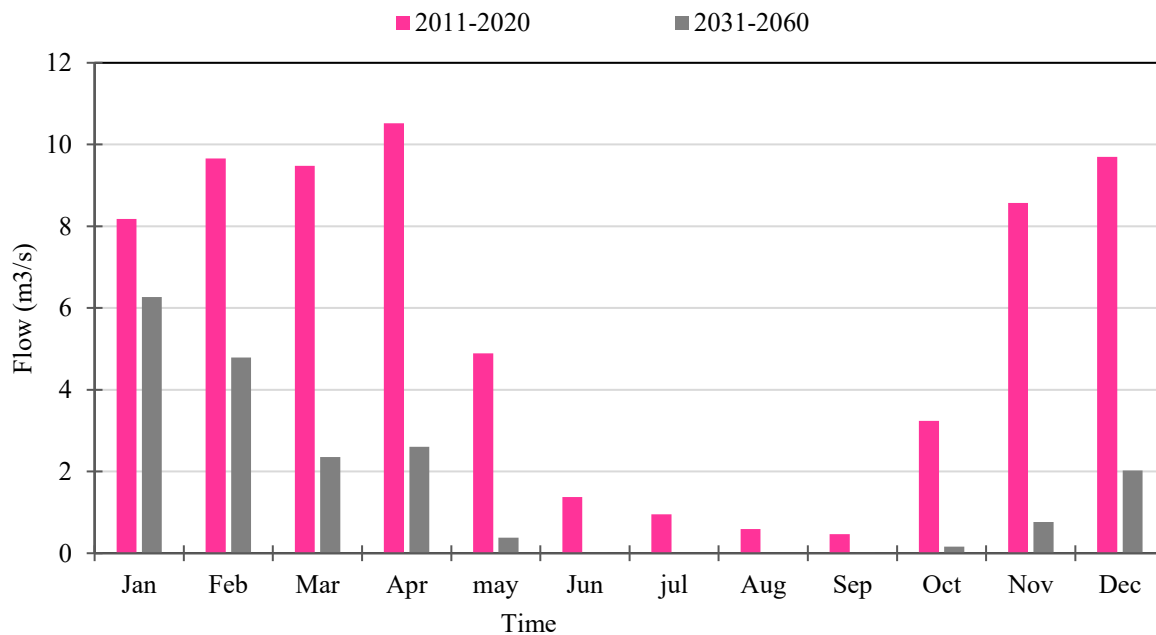


شکل ۱۰. نمودار روند تغییرات میانگین بارش و رواناب در دوره‌های پایه و آینده

Fig 10. Trend chart of average precipitation and runoff changes during the baseline and future periods



شکل ۱۱. نمودار روند تغییرات دبی و بارش در بلندمدت (۲۰۱۰-۲۰۶۰)  
**Fig 11. Long-term trend chart of discharge and precipitation changes (2010-2060)**



شکل ۱۲. نمودار دبی ماهانه رودخانه در دو دوره پایه و آینده  
**Fig 12. Monthly river discharge chart during the baseline and future periods**

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از مدل‌های SWAT و LARS-WG تلاش شد تا تغییرات اقلیمی و اثر آن بر رواناب سطحی حوضه میمه دهلران مورد بررسی قرار گیرد. جمع‌بندی نهایی این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر اقلیم در منطقه دهلران اجتناب‌ناپذیر است، اما

شدت پیامدهای آن به نحوه مدیریت و سیاست‌گذاری وابسته است. در سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2.6 با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، وضعیت منابع آبی قابل کنترل تر خواهد بود، در حالی که تداوم روند فعلی در قالب سناریوی SSP2-4.5 می‌تواند به بحران‌های شدید آبی و زیست‌محیطی منجر شود. از این رو، سازگاری با تغییر اقلیم ضرورتی فوری است. راهکارهایی چون تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی از طریق ذخیره رواناب در سازه‌های کوچک‌مقیاس، اصلاح الگوی کشت و توسعه سامانه‌های هشدار سیلاب باید در اولویت قرار گیرند. با وجود دقت قابل قبول مدل‌ها، محدودیت‌هایی چون کمبود داده‌های بلندمدت، نااطمینانی مدل‌های اقلیمی و نبود داده‌های کیفی آب وجود دارد که می‌تواند بر نتایج اثر بگذارد. در تحقیقات آینده، استفاده از سناریوهای متنوع‌تر، مدل‌های ترکیبی هیدرولوژیکی و بررسی اثرات هم‌زمان تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم توصیه می‌شود تا تصویر جامع‌تری از آینده منابع آب منطقه به دست آید.

نتایج این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که در صورت تحقق روندهای اقلیمی پیش‌بینی‌شده، حوزه آبخیز میمه در دهه‌های آینده با شرایطی گرم‌تر، خشک‌تر و ناپایدارتر از نظر منابع آب روبه‌رو خواهد شد، به طوری که میانگین دبی سالانه از ۵/۶۱ مترمکعب بر ثانیه در دوره پایه به ۱/۵۹ مترمکعب بر ثانیه در آینده کاهش می‌یابد و بیشترین افت جریان در فصول بهار و زمستان مشاهده می‌شود. افزایش دما و تبخیر، کاهش بارندگی مؤثر و افت رواناب سطحی، به همراه تغییر در الگوی زمانی جریان، از مهم‌ترین پیامدهای اقلیمی آینده به شمار می‌روند. این تغییرات نه تنها کمیت منابع آب سطحی را کاهش خواهند داد، بلکه تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی را نیز مختل کرده و خطر بروز خشکسالی‌های هیدرولوژیکی را افزایش خواهند داد. از این رو، سازگاری با تغییر اقلیم ضرورتی فوری است. راهکارهایی چون اقدامات آبخیزداری و تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی، اصلاح الگوی کشت و توسعه سامانه‌های هشدار سیلاب باید در اولویت قرار گیرند. از نظر علمی، پژوهش حاضر با ترکیب مدل‌های LARS-WG و SWAT تحت سناریوهای جدید SSP از گزارش ششم IPCC، گامی نو در تحلیل اثرات تغییر اقلیم در غرب ایران به‌شمار می‌رود. با وجود این، باید توجه داشت که مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی دارای محدودیت‌هایی ذاتی هستند. یکی از محدودیت‌های اصلی، دقت پایین مدل‌های اقلیمی در بازتولید بارش‌های کوتاه‌مدت و شدید است که می‌تواند منجر به خطای نسبی در برآورد رواناب‌های سیلابی گردد. همچنین، عدم دسترسی به داده‌های دقیق‌تر خاک و کاربری اراضی به‌روز، می‌تواند دقت مدل SWAT را تا حدودی کاهش دهد. با وجود این محدودیت‌ها، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های مهم مدیریتی در حوزه‌ی آب منطقه قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در برنامه‌های آبی مدیریت منابع آب حوضه، اصلاح الگوی مصرف، افزایش بهره‌وری آبیاری، اقدامات آبخیزداری و توسعه‌ی پوشش گیاهی در اراضی مرتعی مورد توجه قرار گیرد. همچنین، استفاده از سناریوهای جدیدتر اقلیمی (CMIP7) و مدل‌های ترکیبی اقلیم-هیدرولوژی می‌تواند در آینده موجب افزایش دقت پیش‌بینی‌ها شود.

## منابع

- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs – A user manual*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)
- Akhavan Farshi, A. (2024). *Investigation and analysis of precipitation trend changes and the impact of climate change in the Haraz watershed*. (Master's thesis). Department of Water Science and Engineering, Aban Haraz Higher Education Institute. [in Persian]
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment; Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://ssl.tamu.edu/media/11951/large%20area%20hydrologic%20modeling%20and%20assessment%20part%201.pdf>
- Arnold, J.G., et al. (2012) SWAT: Model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineer*, 55, 1491-1508. <https://swat.tamu.edu/media/99051/azdezasp.pdf>
- Ashofteh, P. S., & Massah Bovandi, A. R. (2010). Impact of climate change on maximum discharges of the Aidoghmoush basin in east Azerbaijan. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources, Water and Soil Science*, 14(53). <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1389.14.53.3.0>

- Azari, M., Moradi, H., Seghafian, B., & Faramarzi, M. (2013). Assessment of hydrological impacts of climate change in the Gorganrud watershed. *Journal of Water and Soil*, (3), 537–547. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26051>
- Bahri, M., & Zahedi, A. (2016). Investigating the impacts of climate change on the hydrological regime of surface flow in the Arazkooseh watershed. *Applied Research Journal of Geographical Sciences*, 16(42), 109–132. [in Persian] <https://jgs.khu.ac.ir/article-1-2690-fa.pdf>
- Behzadi, F., Javadi, S. and Mohammadi, A. (2025). Impact of climate change on rainfall pattern variability in Ilam province using CMIP6 models and rainfall frequency analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(12), 2421-2441. doi: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378779.669746>
- Charles, S. P., Bates, B. C., Hughes, J. P. (2004). A spatiotemporal model for downscaling precipitation occurrence and amounts. *Journal of Climate*, 17(20), 3837–3858.
- Choi, W. (2008). Catchment-scale hydrological response to climate-land use combined scenarios: A case study for the Kishwaukee river basin, Illinois. *Physical geography*, 29, 79–99. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.29.1.79>
- Daba, M., Mamo, G. (2013). *Evaluating potential impact of climate change on hydro-meteoroidal variables in upper Blue Nile basin, A case study Fincha sub-basin*. International Conference on Climate Change Effects, 27-30.
- Esmaili, A., & Abdollahi, Kh. (2011). *Watershed management and soil conservation* (2nd ed.). Mohaghegh Ardabili University Press. [in Persian]
- Fakheri Fard, A., Roomianfar, S., Abuali, H., & Khaki Torabi, A. (2011). *Investigation of climate change effects on inflows to lake Urmia using the SDSM downscaling model*. Fourth Water Resources Management Conference, Amirkabir University of Technology, Tehran. [in Persian] <https://civilica.com/doc/116962>
- Fallah Kalaki, M., Shekari Kuchak, V., & Ramezani Etedali, H. (2021). Simulating climate change effects using CMIP5 and CMIP6 climate models on runoff of the Tashk–Bakhtegan basin through the SWAT hydrological model. *Iranian Water Resources Research*, 17(3), 345–359. [in Persian] <https://doi.org/20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5>
- Forests, Rangelands and Watershed Organization of Iran. (2011). *Feasibility study report on watershed management and renewable natural resources in the Meymeh watershed, Ilam Province*. [in Persian]
- Gassman P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, J. G. Arnold. 2007. The soil and water assessment tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE*. 50(4): 1211-1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Ilam Regional Water Company. (2022). *Study and design of a monitoring network for water resources quality in the Dehloran watershed*. [in Persian]
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis, contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Keshavarz, A. (2023). *Forecasting streamflow using the SWAT hydrological model under climate scenarios influenced by uncertainty*. (Master's thesis). Department of Agricultural Engineering, Water Resources Management, Razi University. [in Persian]
- Mahdavi, M. (2001). *General hydrology*. Ayeh Cultural Center and Publications. 1st edition, 2nd edition. [in Persian]
- Mansouri, B., Ahmadzadeh, H., Massah Bourani, A. R., Morid, S., Dalavar, M., & Lotfi, S. (2014). Assessment of climate change impacts on water resources of the Zarrineh Roud basin using the SWAT model. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*, 28(6), 1191–1203. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.35633>
- Mirdashtvan, M., Najafinejad, A., Malekian, A., Sa'doddin, A. (2018). Downscaling the contribution to uncertainty in climate-change assessments: Representative concentration pathway (RCP) scenarios for the south Alborz range, Iran. *Meteorological Applications*, 25(3), 414–422. <https://doi.org/10.1002/met.1709>
- Naderi, M., Ildermi, A. R., Nouri, H., Aqa-Amin, S., & Zinevand, H. (2017). Assessment of land-use change impacts on runoff in the Garin watershed using the SWAT model. *Hydrogeomorphology*, (14), 23–42. [in Persian] [https://journals.tabrizu.ac.ir/article\\_8255.html](https://journals.tabrizu.ac.ir/article_8255.html)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2009*. Texas Water Resources Institute. <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Noori, M., Sharifi, M.B. and Zarghami, M. (2015). Effects of climate changes on inflow of reservoirs in the uncertainty condition (Case study: Bostan and Golestan dams in the Gorganroud catchment). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(2), 367-380. [https://idj.iaid.ir/article\\_55003\\_en.html](https://idj.iaid.ir/article_55003_en.html)
- Nouroollahi, H. (2014). *Assessment of climate change impacts on water resources in the Ilam Dam watershed*. (Master's thesis). Faculty of Agricultural Sciences, University of Ilam. [in Persian].
- Roygar, H. (2024). *Investigation of river discharge variations under climatic, anthropogenic, and land-use factors* (Doctoral dissertation). Department of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology. [in Persian] <https://shahroodut.ac.ir/fa/thesis/thesis.php?thid=TA773>

- Salehnia, N., et al. (2019). Statistical downscaling on historical run precipitation data over a semi-arid region. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 55, 737–749 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00112-1>
- Semenov, M. A., & Barrow, E. M. (1997). *LARS-WG: A stochastic weather generator for use in climate impact studies*. Technical Report, Institute of Arable Crops Research, Rothamsted Experimental Station, UK. <https://www.researchgate.net/publication/268304865>
- Semenov, M.A, Brooks, R.J, Barrow, E.M, C.W. Richardson (1998). Comparison of the Wgen and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, Vol. 10, No. 2, Pp. 95-107. <https://www.int-res.com/articles/cr/10/c010p095.pdf>
- Shahouri, N., Khalilian, S., Mousavi, S. H., & Marzavi, S. A. (2018). Assessment of climate change impacts on water resources of the Varamin plain using the SWAT model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2), 354–366. [in Persian] [https://idj.iaid.ir/article\\_92966.html](https://idj.iaid.ir/article_92966.html)
- Swart, N. C, Cole, J. N, Kharin, V. V, Lazare, M, Scinocca, J. F, Gillett, N. P. & Sigmond, M. (2019). *CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 CMIP piconrol*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3673>
- Tavakoli, M, De Smedt, F. (2011). Impact of climate change on stream flow and soil moisture in the Vermilion basin, Illinois, USA. *Journal of Hydrologic Engineering*.229-249. <https://ascelibrary.org/action/doSearch?AllField=Tavakoli&SeriesKey=jhyeff>
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P. & Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the scenario model inter-comparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253-293.
- Xu, C.H. (1999). From GCMs to river flow: A review of downscaling methods and hydrologic modeling approaches. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 23(2):229-249. <https://doi.org/10.1177/030913339902300204>
- Zheng, Y, Zhang, M, Wu, B. (2016). *Using high spatial and temporal resolution data blended from SPOT-5 and MODIS to map biomass of summer maize*. 2016 Fifth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics), 1–5. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2016.7577683>